INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA – ITA
(BOLSA DE PÓS-DOUTORADO - CAPES)

PLANO DE PROJETO

Compressão de Dados SAR Brutos Adaptada ao Alvo

Pesquisador:
Marcello G. COSTA

Supervisor:
Renato MACHADO

Maio de 2019

Sumário

1 Resumo

Neste documento é apresentado o plano de projeto para estágio pós-doutoral a ser vinculado ao projeto Pró-Defesa (CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). As atividades partem do estudo de compressão de dados SAR brutos antes de processamento radar para síntese de imagens, como uma alternativa à compressão da imagem sintetizada após o processamento radar. Neste processo, a compressão garante o melhor desempenho para transmissão e armazenamento de dados massivos em operações embarcadas, além de viabilizar a capacidade de operação em tempo-real no processamento radar. Na proposta aqui descrita, a caracterização de alvo no domínio do sinal bruto é explorada no método de análise de transformada. Dessa forma, é possível alcançar ganhos de eficiência de compressão e transmissão e a redução de complexidade no processamento radar, dada a garantia de fidelidade nas regiões de interesse do alvo.

2 Introdução e Justificativa

O radar de abertura sintética (*Synthetic aperture radar – SAR*) é um sistema de imageamento ativo baseado no processamento coerente de múltiplos sinais de eco capturados no percurso de uma plataforma em movimento (aeronave ou satélite), sendo amplamente utilizado em aplicações civis e militares. O SAR transmite sinais chirp e os ecos recebidos são amostrados dentro de componentes In-phase (I) e Quadratura (Q), referenciados como dados SAR brutos [1]-[2]. Sistemas SAR modernos produzem imagens de resoluções muito altas a partir de um grande volume de dados brutos processados[1], fazendo com que a compressão do sinal bruto seja um requisito essencial para redução do volume de dados armazenados onboard, a transmissão eficiente para a estação de solo e capacidade de operação em tempo-real. Isto pode ser alcançado com técnicas de compressão aplicadas ao sinal SAR bruto, que normalmente exploram sua característica de ruído devido ao espalhamento adicionado incoerentemente com fase e amplitude desconhecidas [4]-[5].

As duas principais abordagens de compressão de dados SAR empregam técnicas no domínio espacial e no domínio de transformada. No domínio espacial, são aplicados métodos de quantização diretamente ao sinal, tais como o BAQ (*Block Adaptive Quantization*) [3], BFPQ (*block floating-point quantizer*), BAVQ (*block adaptive vector quantization*), VQ (*vector Quantization*) e TCQ (*Trellis Coded Quantization*), sendo o BAQ mais amplamente reconhecido método de compressão de dados SAR brutos, baseado na quantização escalar controlada pelas estatísticas de blocos do sinal SAR. No entanto, para garantir melhor desempenho de compressão e qualidade, as técnicas de codificação no domínio da transformada são consideradas, onde as dependências estatísticas existentes no sinal original podem ser melhor exploradas por uma transformação otimizada seguida de quantização. Dentro dessa abordagem, as técnicas aplicadas a sinais SAR brutos são baseadas na FFT (*fast Fourier transform*), DCT (*discrete cosine transform*) e *wavelets* [8].

Neste trabalho, a operação radar aplicada a detecção de alvos é considerada, admitindo um grau de degradação nas regiões complementares ao alvo. Dessa forma, um compromisso entre a alta resolução na região de alvo, através da avaliação da imagem sintetizada, e o mais alto grau de redução do dado comprimido são considerados para o desenvolvimento do método de compressão. Dentro desse contexto, métodos baseados em transformadas permitem a adequada caracterização de alvos no domínio SAR bruto, consequentemente, a redução do range

[1]Para produzir imagens coerentes a partir de dados SAR brutos, algoritmos de processamento radar são aplicados. No domínio da frequência, algoritmos para imageamento tais como Range Doppler, chirp scaling e ωk são amplamente empregados. No domínio temporal, o algoritmo backprojection [6] oferece eficiência para operação em tempo-real associada a mais alta fidelidade.

dinâmico médio do sinal SAR resulta no menor tempo de processamento radar, como um requisito para cenários para operação em tempo-real, o que pode ser avaliado sob diferentes processadores aplicados.

3 Objetivos

O objetivo desta pesquisa de pós-doutorado é propor uma caracterização da região de alvo diretamente no sinal SAR bruto no domínio da transformada e, adequadamente quantizar para preservar a melhor resolução nesta região de interesse, conforme estatísticas do sinal. Consequentemente, a análise de desempenho de imagens sintetizadas e a eficiência da operação do processamento radar, em termos de tempo e complexidade, devem ser tais que o operação de imageamento e geração das imagens deve ocorrer em tempo-real com um período mínimo de latência que será definido pelos requisitos de operação do sistema SAR. Dentro deste contexto, busca-se a melhor performance de transmissão em um cenário de sensoriamento remoto e a melhor qualidade das imagens recuperadas para operações de pós-processamento empregadas dentro do interesse do projeto.

Dessa forma, os objetivos específicos considerados no plano do pós-doutarado são:

1. Caracterização de alvos no domínio da transformada de sinais SAR brutos;

2. Compressão baseada em quantização ponderada às regiões do alvo caracterizado; e

3. Adaptação do sinal recuperado ao algoritmo de processamento radar selecionado.

4 Pesquisas Iniciais

Considerando os objetivos apresentados na Seção 3, as pesquisas inicialmente realizadas destacam a fundamentação de compressão de dados SAR brutos através das principais técnicas de compressão apresentadas na literatura, dentre as quais, o BAQ e W-BAQ. Em particular, o método baseado em análise multiresolução do W-BAQ é destacado para a caracterização do alvo no domínio da transformada proposto neste plano. A partir da revisão apresentada nas próximas seções, são desenvolvidas as metodologias sugeridas na proposta de projeto da Seção 5.

4.1 Compressão de Dados SAR Brutos no Domínio do Tempo

Em muitas aplicações de compressão com perdas existe a necessidade de representar as saídas da fonte usando um número pequeno de palavras-código, uma vez que o número de valores distintos da saída da fonte são muito maiores do que as palavras-códigos disponíveis para representá-las. A quantização permite representar esses infinitos valores em um conjunto de dados muito menores. Usando métodos de quantização adaptativa é possível alcançar uma efetiva compressão de dados para uma fonte com parâmetros variáveis no tempo.

Nesse método, as estatísticas da fonte são estimadas e ajustas para a operação otimizada do quantizador. Como a quantização causa muitas perdas de informação, o valor quantizado reconstruído é diferente do valor do sinal de entrada do quantizador. Tal diferença é chamada de erro de quantização, medido através da teoria de taxa-distorção por $d(x, Q(x))$, representando a distorção instantânea de Q na entrada x. Para uma variável aleatória X, a distorção esperada é dada por:

$$D(Q) = Ed(X, Q(X)). \tag{1}$$

Nesse caso, a fonte X tem função densidade de probabilidade (PDF) $f(x)$ e, pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} Ed(X, Q(X)) = \sigma_q^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} d(x, Q(x)) f(x) dx \\ &= \sum_{i=1}^{N} \int_{R_x} d(x, Q(x)) f(x) dx \\ &= \sum_{i=1}^{N} \int_{x_{i-1}}^{x_i} d(x, Q(x)) f(x) dx. \end{aligned} \tag{2}$$

Assumindo-se que $d(x, y) = (x-y)^2$, então $D(Q)$ é chamado erro médio quadrático (MSE) de Q e, $e = Q(X) - X$ é então definido como o erro de quantização, desde que

$$Q(X) = X + Q(X) - X = X + e \tag{3}$$

$$D(Q(X)) = E[(X - Q(X))^2] = E(e^2) \tag{4}$$

Outra medida de qualidade derivada da distorção de quantização é a relação sinal-ruído (SNR), representada por:

$$\textbf{SNR} = 10\textbf{log}_{10}\frac{E(X^2)}{D(Q)} \quad \textbf{dB}, \tag{5}$$

ou comparando com a potência do sinal de entrada,

$$SNR_{dB} = 10 \log \left(\frac{\sigma_x^2}{\sigma_q^2}\right), \tag{6}$$

onde σ_x^2 é a variância do sinal da fonte.

É possível observar das relações apresentadas que, menores intervalos de decisão terão menores erros $(\hat{x} - x)^2$ e, consequentemente, MSE de quantização σ_q^2. Dessa forma, O posicionamento ótimo dos limites de decisão e valores quantizados são atingidos com minimização de σ_q^2 em quantizadores escalares ótimos, definidos como:

$$Ed(X, Q^*(X)) = \min_{Q \in Q_N} Ed(X, Q(X)), \tag{7}$$

onde Q_N denota de todos N-níveis quantizadores e $Q^* \in Q_N$ é o quantizador ótimo.

4.1.1 O Algoritmo *Block Adaptive Quantization* – BAQ

O diagrama de blocos do algoritmo BAQ é apresentado na Figura 1. Neste esquema, o quantizador Lloyd-Max [7] representa o principal módulo do sistema e possui uma adaptação para as estatísticas bloco-a-bloco do sinal.

Basicamente, o algoritmo consiste em (i) representar o dado SAR complexo em seus componentes cartesianos (I e Q), (ii) dividir cada cada canal em blocos relativamente pequenos e (iii) adaptação dos parâmetros de quantização dentro de cada bloco (threshold e valores de reconstrução) para utilização no quantizador Lloyd-Max, dessa forma, reduzindo o número requerido de bits para cada bloco. Os detalhes do algoritmo são apresentados nos passos a seguir.

1. Estimação da variância do bloco;

2. Cálculo do threshold ótimo;

3. Quantização do dado usando os thresholds ótimos com $2, 3, 4, 5, 6$ ou 8 bits;

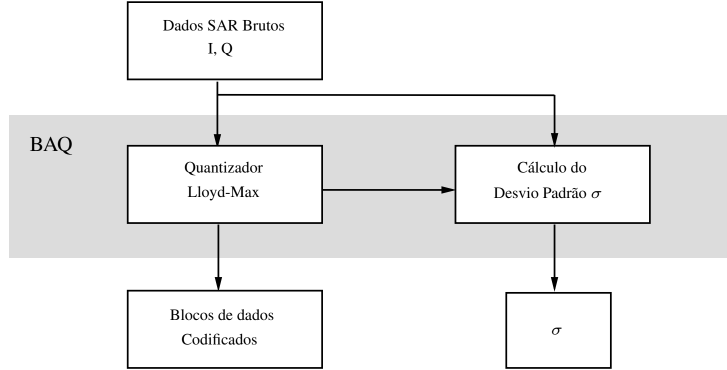


Figura 1: Esquema de codificação dos dados SAR brutos realizada pelo algoritmo BAQ [3].

4. Transmissão do dado quantizado com a varância;
5. Cálculo dos níveis de trheshold ótimos na decodificação;
6. Reconstrução do dado quantizado.

O quantizador é controlado pelas estatísticas do sinal de entrada que podem ser especificadas por um único parâmetro de sua distribuição de probabilidade (por assumir ser gaussiana). Esse parâmetro é selecionado para caracterizar a magnitude média do sinal, que pode descrita por

$$|\bar{I}| = |\bar{Q}| = 2\sum_{n=0}^{N-1}(X_n + \frac{1}{2})\int_{x_n}^{x_n+1} p(x)dx \tag{8}$$

e

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma 2}}, \tag{9}$$

onde x é a máxima magnitude média do sinal e σ é o desvio padrão do sinal. Podendo ser simplificado para:

$$|\bar{I}| = |\bar{Q}| = 127.5 - \sum_{n=0}^{127} erf\left(\frac{n+1}{\sqrt{2\sigma}}\right) \tag{10}$$

Estruturalmente, no esquema do BAQ, as amostras do sinal SAR são divididas em blocos para estimação das estatísticas e quantização que, é otimizada para cada bloco. Dessa forma, o desvio padrão de cada bloco é estimado, a partir de

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{MN}\sum_{i=0}^{M-1}\sum_{j=0}^{N-1} x_{ij}^2}, \tag{11}$$

onde M, N são os números de amostras das linhas e colunas de cada bloco, respectivamente. Para uma operação ótima, os valores de *threshold* são proporcionais ao desvio padrão de cada bloco, sendo esses valores determinados pelo cálculo da magnitude média de um bloco usando valores tabelados. Dessa forma, a quantização é feita pela comparação de uma amostra da entrada com o conjunto de *thresholds*. Assim, para cada bloco, os níveis de saída do quantizador não-uniforme são multiplicados pelo desvio padrão do bloco e, na descompressão, o mesmo desvio padrão de cada bloco é transmitido e usado para a reconstrução do sinal.

4.2 Compressão de Dados SAR Brutos no Domínio da Transformada

A transformada é um método que decompõe um sinal em termos de coeficientes descorrelacionados que podem ser quantizados independentemente de outros, demandando diferentes alocações de bits de quantização conforme o grau de importância. A melhor base de sinal para a decomposição, i.e., a com melhor compactação da energia do sinal dentro de poucos coeficientes apresenta a mais alta taxa de compressão para uma dada fidelidade. Quando os coeficientes são gaussianos, a base de Karhunen-Loève (KLT) é ótima, no entanto, a alta complexidade computacional da KLT é inviável para aplicações sobre dados SAR brutos. Dessa forma, outras bases ortonormais para decomposição do sinal são aplicadas, tais como Transformada de Fourier (TF), a transformada discreta do cosseno (DCT) e a transformda wavelet (DWT).

Especificamente, a DWT é baseada no princípio de que a descorrelação eficiente pode ser alcançada por splitting o dado dentro de duas subsequências contendo informações de passa-baixas e passa-altas do sinal original, sendo que a maior energia do sinal é carregada pela sequência passa-baixas, que garante a compactação de energia necessária. Na aplicação para compressão de dados SAR o uso de transformadas são baseadas na normalização de blocos dos coeficientes I e Q, que assumem o modelo de um processo Gaussiano estacionário com densidade espectral de potência (psd) nas direções range e azimute. Particularmente, a psd na direção range é definida pelo comprimento de banda do pulso chirp, en-

quanto que a psd na direção azimute é proporcional ao padrão da antena azimute. Essas pdf's apresentam leve comportamento passa-baixas, mais evidente na direção range, demonstrando a existência de certa quantidade de correlação dentre as amostras que podem ser exploradas pelo princípio da transformada [8].

O método apresentado na Figura 2 descreve o processo de compressão de dados SAR com a aplicação de transformada. Considerando que os coeficientes da transformada são distribuídos gaussianamente, o BAQ pode ser aplicado para a quantização dos dados. Dessa forma, os coeficientes da transformada de cada bloco são quantizados e transmitidos com o desvio padrão calculado.

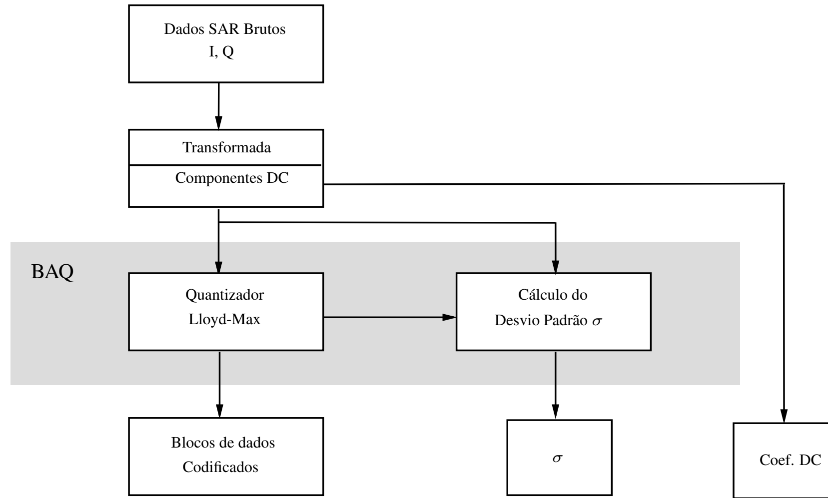


Figura 2: Esquema de codificação dos dados SAR brutos no domńio da trasformada (DCT/*wavelet*) seguida da quantização realizada pelo algoritmo BAQ.

4.3 Medidas de Qualidade

Os parâmetros de básicos para avaliação de qualidade e comparação entre algoritmos de compressão de sinais SAR complexos são a taxa de compressão (CR), relação sinal-ruído (SNR), Erro Médio de Fase (MPE) e o Desvio Padrão da Fase (PSD), além de medidas de qualidade observadas nas imagens sintetizadas geradas a partir do sinal SAR descomprimido. As formulações desses parâmetros são descritas a seguir:

$$\text{SNR} = 10\log\left[\frac{\frac{1}{K_aK_r}\sum_{i=1}^{K_a}\sum_{j=1}^{K_r}x_{ij}^2}{\frac{1}{K_aK_r}\sum_{i=1}^{K_a}\sum_{j=1}^{K_r}(x_{ij}-\bar{x_{ij}})^2}\right] \tag{12}$$

$$\text{MPE} = \frac{1}{K_a K_r} \sum_{i=1}^{K_a} \sum_{j=1}^{K_r} |\phi_{ij} - \varphi_{ij}| \tag{13}$$

Onde x_{ij} e $\bar{x_{ij}}$ são as amostras do dado e o dado codificado, respectivamente. Ka e Kr são o número elemento em azimute e range.

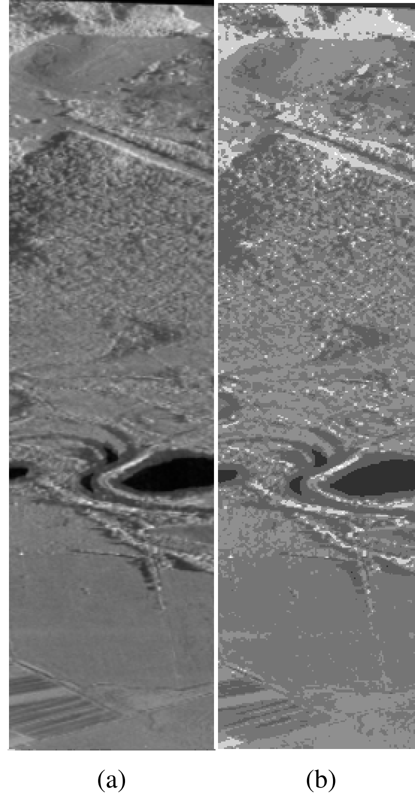
$$\text{PSD} = \sqrt{\frac{1}{K_a K_r} \sum_{i=1}^{K_a} \sum_{j=1}^{K_r} |\phi_{ij} - \varphi_{ij}|^2} \tag{14}$$

A MPE e o (PSD) são métricas importantes para aplicações interferométricas em que a acuracidade das informações de fase do sinal é essencial para a geração adequada das imagens.

Um exemplo de aplicação com avaliação da compressão do sinal SAR bruto submetido ao algoritmo BAQ é apresentado na Figura 3 e na Tabela 1. Neste exemplo, a simulação de desempenho do BAQ é realizada usando software IDL e Matlab e, empregando dados SAR complexos brutos, onde os canais I e Q do sinal são submetidos individualmente ao algoritmo BAQ em blocos de 32×32 para extração das medidas estatísticas aplicadas ao quantizador. Como resultado, o sinal SAR recuperado e submetido ao processamento radar é capaz de reconstruir a imagem com baixa degradação, conforme observado na Figura 3.

Tabela 1: Desempenho do Algoritmo BAQ usando 4 bps aplicados aos canais SAR no domínio do sinal bruto em amostras de 8192×2048 em range e azimute cedidas pela BRADAR.

Canal SAR	CR	SNR	MPE	PSD
I	2.7	14.0	11.56	10.0
Q	2.7	13.9	11.34	10.2



(a) (b)

Figura 3: Imagens geradas pelo processamento SAR Range Doppler a partir do sinal SAR complexo (dados brutos) em cena de 8192×2048 amostras em range e azimute cedidas pela BRADAR: (a) Imagem sintetizada a partir do sinal SAR original e (b) Imagem sintetizada a partir do sinal SAR recuperado do BAQ com blocos de 32×32.

5 Proposta de Projeto

A proposta de pesquisa aborda a transmissão eficiente de sinais SAR brutos, obtidas de dataset específico do projeto, através de técnicas de compressão e, ainda, a redução observada no tempo de processamento da síntese de imagens no processamento radar com os dados SAR brutos recuperados. Particularmente, são considerados para a compressão a abordagem BAQ no domínio da transformada wavelet. Dentro deste contexto, busca-se desenvolver um método de caraterização das regiões de alvos potenciais para aplicação em uma análise multiresolução no domínio do sinal SAR bruto. Uma abordagem previamente realizada pelo autor em [9] aplica técnica de denoising em sianis SAR brutos, porém, sem a caracte-

rização de alvos. A correta descrição do alvo seleciona os coeficientes da região de interesse para uma quantização de ordem superior, mantendo menores níveis de quantização nas regiões complementares. Neste ponto, propõe-se um limiar de seleção de níveis de quantização ponderados aos coeficientes correspondentes às regiões de alvos potenciais. Dessa forma, a região mais provável do alvo de interesse é mantida com a mais alta resolução e melhores índices de quantização no processo de codificação, o que garante maiores taxas de compressão.

Uma consequência direta é a simplificação no processamento radar, com um menor volume de dados a serem processados, dessa forma, considerando os processadores range-doppler e Backprojection como referências, pretende-se observar a capacidade para operação de tempo reduzida em relação ao sinal SAR bruto não comprimido. Tal análise parte das medidas de tempo dentro dos intervalos de tempo de compressão e processamento radar, descritos na Figura 4, a seguir.

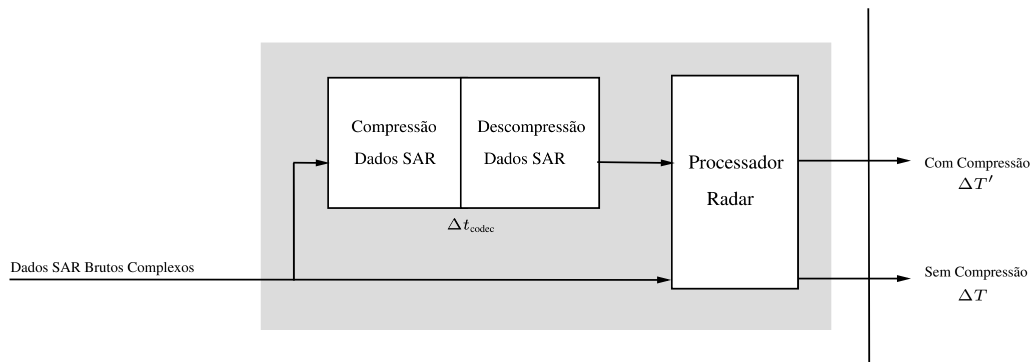


Figura 4: Análise de operação em tempo real do sistema SAR considerando o fluxo do sinal SAR bruto para síntese e os tempos de codificação e processamento envolvidos.

Consequentemente, espera-se obter:

1. Caracterização potencial do alvo no domínio da transformada;
2. Método de quantização ponderada aos coeficientes do sinal SAR transformado potenciais de alvo (região do alvo)
3. Aplicação no processamento radar para operação em tempo-real (processador temporal e range doppler)
4. Fidelidade da imagem de síntese para aplicações de interesse (detecção de alvo, classificação, etc.)

6 Cronograma de Atividades Previstas

De uma forma geral, o cronograma apresentado na Tabela 2 descreve as atividades previstas para o estágio pós-doutoral, compreendendo, inicialmente, um período de 7 meses (maio/2019 a dezembro/2019).

Período	**Atividades**
Mai. 2019	• Plano de Trabalho do Pós-Doutorado e Documentação para implementação da bolsa. • Integração com o grupo de pesquisa e pesquisas iniciais.
Jun. 2019	• Aplicação de métodos de compressão de sinais SAR brutos em conjuntos de dados disponibilizados para o Projeto.
Jul. 2019	• Caracterização do alvo no sinal SAR bruto no domínio da transformada $\rightarrow$ Resultado # 1.
Ago. 2019	• Método de decisão para quantização em função da região do alvo caracterizada no domínio da transformada (sinal SAR bruto) $\rightarrow$ Resultado # 2.
Set. 2019	• Análise de desempenho do sinal comprimido e recuperado após o processamento radar (imagem SLC).
Out. 2019	• Simulações e testes para o desempenho de operação em tempo-real $\rightarrow$ tempo de codificação/decodificação + tempo de processamento radar.
Nov. 2019	• Elaboração de *abstract* estendido envolvendo o resultado # 1 para conferência internacional IGARSS (*International Geoscience and Remote Sensing Symposium*)/2020. • Elaboração de relatório do pós-doutorado.
Dez. 2019	• Elaboração de artigo envolvendo o resultado # 2 em periódico das sociedades *IEEE Geoscience and Remote Sensing (GRSS), IEEE Signal Processing Society (SPS) ou IEEE Communications Society (ComSoc).* • Fechamento do relatório do pós-doutorado.

Tabela 2: Cronograma de atividades previstas para o estágio de pós-doutorado considerando um período inicial de 7 meses.

7 Considerações Finais

O método de compressão de sinais SAR brutos orientada ao alvo proposto neste plano considera a necessidade de transmissão eficiente e operação em tempo-real de imagens SAR sintetizadas, o que viabiliza a implementação de processadores radar com tempo reduzido e com qualidade das imagens de síntese adequadas por manter alta resolução nas regiões de interesse, reduzindo a complexidade nas análises de pós-processamento, tais como a detecção de alvos e classificação. Adicionalmente, os desdobramentos da pesquisa proposta incluem a integração com pesquisas relacionadas dentro do grupo de trabalho do projeto Pró-Defesa e a estruturação de laboratório para simulação e ensaios para prosseguimento de futuras pesquisas na área de radares no contexto acadêmico-institucional.

Referências

[1]CURLANDER, J.C.; MCDONOUGH, R. N. **Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing**. New York: John Wiley & Sons, 1991.

[2]JAKOWATZ, Jr.; WAHL, D.E; EICHEL, D.C.; THOMPSON, P.A. **Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach**. [sl]: Kluwer Academic Publishers, 1996.

[3]KWOK, R.; JOHNSON, W.T. Block adaptive quantization of magellan sar data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 27, n. 4, p. 375–383, 1989.

[4]BENZ, U.; STRODL, K.; MOREIRA, A. A comparison of several algorithms for SAR raw data Compression. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 5, p. 1266–1276, 1994.

[5]PESKOVA, S.; VNOTCHENKO, S. Analysis of complex sar raw data compression. In: SAR WORKSHOP: CEOS COMMITEE ON EARTH OBSERVATION SATELLITES, 1999, Toulouse, France. **Proceedings...** Paris: European Space Agency, 2000. ESA-SP vol. 450, p. 619–623.

[6]XIAO, S.; MUNSON, D.C.; BASU, S.; BRESLER, Y. An $N^2 \log N$ back-projection algorithm for SAR image formation. In: ASILOMAR CONFERENCE ON SIGNALS, SYSTEMS AND COMPUTERS, 2000, Pacific Grove, CA, USA. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2002. vol. 1, p. 3–7.

[7]LLOYD, S.P. Least squares quantization in pcm. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 28, n. 2, p. 129–137, 1982.

[8]BEAUCOUDREY, N.; MERCIER, G. Compression de données brutes et d'images de radar à synthèse d'ouverture. In: ANNALES DES TÉLÉCOMMUNICATIONS, 2000. **Proceedings...** sl: Springer-Verlag, 2001. vol. 56, Issue: 11-12, p. 646–654.

[9]COSTA, M.G.; FERNANDES, D.; PINHO, M.S. Curvelet-based compressive sensing for insar raw data. In: CONFERENCE ON IMAGE AND SIGNAL PROCESSING FOR REMOTE SENSING, 21., 2015, Toulouse, France. **Proceedings...** Bellingham: SPIE, 2015. p.96431C-1–11.